Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 4, Winter 2022, p. 497-513

Energy Flow Simulation of the Uneven Span Glass Greenhouse with Special Structure using Computational Fluid Dynamics (CFD)

F. Motazedian[1], M. Taki[2*], R. Farhadi[3], M. Rahmati- Joneidabad[4]

1- MSc Student, Department of Agricultural Machinery and Mechanization, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran
2- Associate Professor, Department of Agricultural Machinery and Mechanization, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran
3- Assistant Professor, Department of Agricultural Machinery and Mechanization, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran
4- Assistant Professor, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran
(*- Corresponding Author Email: mtaki@asnrukh.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2021.70400.1038

Received: 13-05-2021 Revised: 04-07-2021 Accepted: 13-07-2021 Available Online: 13-07-2021	**How to cite this article:** Motazedian, F., Taki, M., Farhadi, R., & Rahmati- Joneidabad, M. (2022). Energy Flow Simulation of the Semi-double Glass Greenhouse with Special Structure using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Journal of Agricultural Machinery*, *12*(4), 497-513. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2021.70400.1038

Introduction

Greenhouse cultivation is the popular intensive kind of crop production with a yield per cultivated unit area more than 10 times higher compared to field crops. Greenhouse production requires the use of large amounts of energy, water, and pesticides and it usually generates huge quantities of wastes to be disposed of it. Investment, labor, and energy costs per unit area are much higher in the greenhouse industry than in any other agricultural sectors. Sustainable greenhouse systems, socially supportive, commercially competitive, and environmentally sound, depend on cultivation techniques, equipment management, and constructive materials that aim to reduce agrochemicals, energy and water consumption as well as waste generation. The management of the greenhouse environment is depending on temperature manipulation. Temperature manipulation is critical to influencing plant growth, quality, and morphology and so is a major strategy in the environmental modification of crops. Heterogeneous indoor microclimate of a greenhouse has long become a matter of concern in many studies. It is believed to be unfavorable for crop growth, which damages crop activity, particularly transpiration and photosynthesis, one of the major causes of non-uniform production and quality. Since early and conventional methods are not sufficient to evaluate microclimate variables inside a greenhouse, Computational Fluid Dynamics (CFD) approach was applied for better and more accurate results. CFD is an effective numerical analysis technique to predict the distribution of the climatic variables inside cultivation facilities. Numerous studies have focused on the internal temperature, humidity, solar radiation, and airflow inside multiple cultivation facilities. For example, the CFD method was used to simulate natural ventilation for agricultural buildings and improve crop production systems. The CFD simulation and evaluation models could be applied for evaluation of the inside situation and temperature in greenhouses. Thermal and water vapor transfer is influenced by the openings of greenhouses in the CFD simulation. The CFD model was developed to predict the distribution of temperature, water vapor, and CO_2 occurring in a Venlo-type semi-closed glass greenhouse equipped with air conditioners. Based on the above literature, this research aims to evaluate the energy flow and modeling of an un-even semi-buried greenhouse using external and internal variables and numerical solutions by the CFD method.

Materials and Methods

In this study, Computational Fluid Dynamic (CFD) solution was applied to evaluate the inside environment of a semi-double glass greenhouse with an east-west location. This greenhouse has a special structure that is used in very hot or very cold areas due to its depth of more than one meter below the ground. The greenhouse has an area of $38m^2$ and an air volume of $78.8m^3$. The temperature and humidity data were collected from inside and outside the greenhouse by temperature sensors (SHT 11 model made by CMOS USA). Irradiation data were collected inside the greenhouse, on level ground, by the TES132 radiometer.

Results and Discussion

In this study, the CFD method was used for a model solution with ANSYS Fluent version 2020R2 software. To evaluate the predictive capability of the model and its optimization, the comparison between actual (ya) and predicted values (yp) was used. Three criteria of RMSE, MAPE, and R^2 were also used to evaluate the accuracy of the final model. The results showed that the dynamic model can accurately estimate the temperature of the air inside the greenhouse at a height of 1 m (R^2 = 0.987, MAPE = 2.17%) and 2 m (R^2 = 0.987, MAPE = 2.28%) from the floor. The results of energy flow showed that this greenhouse transfers 6779.4.4 kJ of accumulated thermal energy to the ground during the experiment.

Conclusion

In the present study, the computational fluid dynamics method was used to simulate the internal conditions of an un-even semi-buried greenhouse with external and internal variables including temperature and solar radiation. The results showed that this greenhouse structure is able to transfer part of the increase in temperature caused by sunlight to the soil depth (104.214 kJm^{-2} heat through the floor, 178.443 kJm^{-2} through the north wall and 113.757 kJm^{-2} through the south wall). By increasing the thermal conductivity of the inner surface of the greenhouse, the heat flux to the depth of the soil can be increased.

Keywords: Dynamic model, Energy storage, Heat transfer, Semi-buried greenhouse

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، ص ۵۱۳-۴۹۷

شبیه‌سازی جریان انرژی گلخانه نیمه‌دوطرفه شیشه‌ای با ساختار ویژه با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

فرخ معتضدیان[1]، مرتضی تاکی[2*]، روح اله فرهادی[3]، مصطفی رحمتی جنیدآباد[4]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۲

چکیده

این تحقیق، به شبیه‌سازی جریان انرژی یک گلخانه نیمه‌مدفون نیمه‌دوطرفه با استفاده از متغیرهای بیرونی و داخلی و حل عددی به روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) می‌پردازد. در این تحقیق، داده‌های دما، رطوبت و تابش به‌صورت لحظه‌ای اندازه‌گیری شد و سپس از CFD جهت بررسی توزیع انرژی و تغییرات دما در دو ارتفاع ۱ و ۲ متری از سطح زمین استفاده گردید. گلخانه مورد بررسی، به‌صورت یک گلخانه بسته در نظر گرفته شد و با توجه به روابط تجربی-ریاضی موجود در منابع، میزان دریافت، تلفات و خالص جذب شده انرژی در گلخانه محاسبه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که روش CFD با ۳۲۶۰۳۰ المان چهار وجهی (tetrahedral) قادر است دمای هوای داخل گلخانه را با دقت مناسب در ارتفاع ۱ متری (R^2=۰/۹۸۷، MAPE=۲/۱۷ درصد) و ۲ متری از کف (R^2=۰/۹۸۷، MAPE=۲/۲۸ درصد) تخمین بزند. بررسی جریان انرژی نشان داد که این گلخانه، ۶۷۷۹/۴ کیلوژول انرژی حرارتی انباشته ناشی از پرتوهای تابش را در مدت زمان آزمایش به زمین منتقل می‌کند و نسبت به سازه‌های روی سطح زمین، به‌طور متوسط حدود ۴۰٪ تابش کم‌تری دریافت می‌کند. نتایج کلی این تحقیق و بررسی روند تغییرات دما در کف و دیواره‌ها نشان داد که در مناطق گرم کشور، زمین به‌عنوان منبع خوبی برای دریافت گرمای انباشته موجود در محیط گلخانه است و هرچه پوشش سطح داخلی گلخانه رسانایی گرمایی بیشتری داشته باشد، شار حرارتی به سمت عمق خاک بیش‌تر است.

واژه‌های کلیدی: انتقال حرارت، ذخیره انرژی، گلخانه نیمه‌مدفون، مدل دینامیکی

مقدمه

استفاده از محیط کنترل‌شده در کشاورزی مانند آنچه در گلخانه اتفاق می‌افتد می‌تواند به تولید ۱۰ تا ۲۰ برابری نسبت به شرایط معمولی (کشت در مزرعه) منجر شود (Hamdani, Taki, Rahnama, Rohani, & Rahmati-joneidabad, 2020). گلخانه به دلیل امکان افزایش زمان بهره‌برداری ۱۲ ماهه از زمین به جای یک فصل زراعی و همچنین امکان کنترل بهتر عوامل اقلیمی مورد نیاز گیاه و رفع محدودیت‌ها، شرایط بهبود عملکرد و کیفیت تولیدات کشاورزی را به نحو مؤثری داراست، مشروط بر این‌که ساختار گلخانه واقعاً توان استفاده از این پتانسیل را داشته باشد (Ahamed, Guo, & Tanino, 2019). با این حال هزینه بالای مصرف انرژی در گلخانه‌ها از بزرگ‌ترین چالش‌های مدیریت گلخانه به حساب می‌آید. در مناطق سردسیر، هزینه گرمایش در گلخانه بعد از هزینه نیروی کار مهم‌ترین بخش هزینه مصرفی گلخانه به حساب می‌آید. حدود ۶۵ تا ۸۵٪ از مجموع انرژی مصرف شده در گلخانه صرف گرم کردن آن می‌شود. این میزان به نسبت مصرف انرژی الکتریکی و حمل‌ونقل بسیار زیاد به نظر می‌رسد (Pakari & Ghani, 2019). در مناطق گرمسیر نیز بیشترین مصرف انرژی سهم کاهش دمای گلخانه است (Ghani *et al.*, 2019). یکی دیگر از دلایل اصلی بالا بودن مصرف انرژی در گلخانه‌های ایران، پوشش و ساختار نامناسب و غیرعلمی در انواع گلخانه‌های مرسوم است (Taki, Rohani, & Rahmati-Joneidabad, 2018). بر همین اساس ابتدایی‌ترین اصول مهندسی در ساخت گلخانه‌های کشاورزی معمولاً مبتنی بر مدل‌سازی اولیه

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران
۳- استادیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران
۴- استادیار، گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: mtaki@asnrukh.ac.ir
https://doi.org/10.22067/jam.2021.70400.1038

فرآیند انتقال حرارت و جرم می‌باشد که متأسفانه در این راستا تحقیقات بسیار اندکی انجام گرفته است (Wang *et al.*, 2017).

کنترل محیطی بر میزان تولید محصولات کشاورزی و کیفیت آن تأثیر دارد، به‌طوری‌که بازده محصول تولیدی به تنظیم شرایط داخلی گلخانه مانند رطوبت، دما و دی‌اکسید کربن موجود در هوا وابسته است (Zhang, You, Tian, & Li, 2019). نتایج یک تحقیق نشان داد که می‌توان تا ۷۰٪ از هدر رفت انرژی را به‌وسیله به‌سازی و طراحی مناسب گلخانه‌ها جلوگیری کرد (Taki *et al.*, 2018). به‌واسطه این‌که پیش‌بینی شرایط محیطی داخل گلخانه نقش حیاتی در افزایش عملکرد و انرژی مصرفی درون گلخانه دارد (مخصوصاً در مناطق سرد و گرم)، بسیار مهم به نظر می‌رسد و این امر مستلزم شناخت تغییرات لحظه‌ای درون گلخانه‌ی متأثر از آب‌وهوای بیرون است (Saberian & Sajadie, 2019). یکی از بهترین و دقیق‌ترین راه‌های بررسی این موضوع، موازنه انرژی و جریان داخل گلخانه است. پیچیدگی‌های مدل با توجه به تنوع عوامل مؤثر (انرژی خورشیدی، تبادل حرارت بیرون و درون، قابلیت ذخیره‌سازی گرمای درون اجسام و موقعیت قرارگیری) و تأثیر آن‌ها، شبیه‌سازی را از نظر محققین در دو طیف (مدل‌های ریاضی و مدل جعبه سیاه[1]) قرار داده است (Ahamed *et al.*, 2019). در این راستا تحقیقات متعددی در انواع گلخانه‌ها صورت گرفته است. در تحقیقی، مدلی شبه پایا به‌منظور پیش‌بینی درجه حرارت خاک و هوای داخلی گلخانه‌ای در عراق معرفی و بررسی شد (Joudie & Farhan, 2015). داده‌ها در این تحقیق به کمک حسگرهای نصب شده درون و بیرون گلخانه برداشت و ثبت شدند. مؤلفه‌های اصلی مورد بررسی، دمای هوای داخل و کف گلخانه بود. نتیجه بررسی نشان از تطابق خوب مدل با داده‌های تجربی داشت؛ به‌طوری که میزان خطای مطلق کمتر از ۱۰٪ گزارش شد. در پژوهشی دیگر، با طراحی یک مدل حرارتی شبه‌پایا به پیش‌بینی نیاز حرارتی یک گلخانه مرسوم در فصل سرد سال پرداخته شد (Ahmed *et al.*, 2019). این سامانه بر مبنای ورودی انرژی و جرم از محیط پیرامون گلخانه و خواص فیزیکی و حرارتی گیاه موجود در گلخانه طراحی شده بود و با ثبت لحظه‌ای ورودی‌ها به بررسی تمام پارامترهای حرارتی تأثیرگذار بر شرایط داخل گلخانه می‌پرداخت. نتایج نشان داد که بیشترین میزان گرمای ازدست‌رفته در فصل سرد سال ناشی از جریان رسانش و جابه‌جایی بوده و بیشترین تأثیر تبخیر و تعرق مربوط به فصل تابستان است. یافته‌های این تحقیق نشان داد که با کنترل شرایط محیطی، سیستم قادر است بین ۱۳ تا ۵۶٪ از نیاز حرارتی سیستم را کاهش دهد. در تحقیق دیگری، روابط عمومی انتقال حرارت به منظور شبیه‌سازی شرایط داخلی گلخانه‌ای گنبدی شکل در کشور عربستان ارائه شد (Abdel Ghany & Helal, 2011). در این تحقیق گلخانه‌ای پلاستیکی به مساحت ۳۴ مترمربع ساخته و فرآیند انتقال حرارت بین گیاه، پوشش گلخانه، خاک و هوای داخل گلخانه شبیه‌سازی شد. همچنین نرخ تبخیر و تعرق گیاه به‌صورت یک عدد ثابت در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که اگر شاخص سطح برگ برای گیاه گوجه‌فرنگی کمتر از ۱/۵ باشد، میزان خطای مدل حدود ۱/۷٪ خواهد بود و اگر شاخص سطح برگ بیشتر از ۵ باشد، خطا تا حدود ۰/۷٪ کاهش خواهد یافت و از کل تابش خورشیدی ورودی به گلخانه، حدود ۱۰٪ آن صرف تبخیر و تعرق گیاه شده بود. در تحقیقی مشابه، شبیه‌سازی رفتار گلخانه تونلی شکل در یک روز آفتابی در کشور یونان مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش دو حالت کلی در نظر گرفته شد. در حالت اول، عمل شبیه‌سازی با فرض ثابت بودن دمای محیط بیرون انجام گرفت و در حالت دوم دمای خارج گلخانه متغیر فرض شد. نتایج نشان داد که مهم‌ترین پدیده در بررسی فرآیند انتقال حرارت داخل این گلخانه، همرفت است. نتایج کلی نشان داد که متغیر بودن دمای خروجی باعث نزدیک شدن مقادیر شبیه‌سازی با داده‌های تجربی می‌شود (Fidaros, Baxevanou, Bartzanas, & Kittas, 2010). در تحقیق دیگری به مقایسه دقت CFD و شبکه‌ای عصبی مصنوعی در پیش‌بینی دمای خروجی یک جمع‌کننده صفحه تخت خورشیدی پرداخته شد (Nadi, Abdanan Mehdizadeh, & Nourani Zonouz, 2016). نتایج کلی این تحقیق نشان داد که پیش‌بینی‌های مدل شبکه عصبی مصنوعی به لحاظ آماری نسبت به CFD از دقت بالاتری برخوردار است ولی قادر به برون‌یابی و بررسی شرایط خارج از حالت آموزش دیده نیست. در پژوهشی دیگر، مدل‌های ریاضی (رگرسیون چندگانه و روابط انتقال حرارت) و هوش مصنوعی جریان انرژی یک گلخانه نیمه‌خورشیدی در شهرستان تبریز مورد بررسی قرار گرفت (Taki, Ajabshirchi, Ranjbar, Rohani, & Matloobi, 2016a). نتایج نشان داد که اگرچه مدل هوش مصنوعی از دقت بسیار بالایی در پیش‌گویی شرایط دمایی داخل برخوردار است اما مدل‌سازی ریاضی قادر است پیش‌بینی دقیقی از انرژی‌های انباشته و هدر رفته و حجم جابه‌جایی هوای درون گلخانه ارائه دهد و به حدس دقیقی از دما، رطوبت و دیگر پارامترهای داخلی گلخانه برسد. در تحقیق دیگری، از مدل‌های ریاضی به منظور انتخاب بهترین نوع ساختار گلخانه از نظر دریافت انرژی و تلفات حرارتی استفاده شد. نتایج حاکی از همبستگی بالا (R^2=0.9) بین داده‌های مدل دینامیک سیالات محاسباتی با مقادیر واقعی بود (Ghasemi Mobtaker, Ajabshirchi, Ranjbar, & Matloobi, 2019). در تحقیق دیگری فرآیند تهویه و سرمایش یک گلخانه و جانمایی محل قرارگرفتن فن‌ها، دریچه‌ها و پدها روی سازه گلخانه توسط CFD شبیه‌سازی شد (Moghaddam, Ozlati, Zarei, Momeni, & Azadshahraki,

---

1- Black box

2021). نتایج این تحقیق نشان داد که به کمک CFD می‌توان محل مناسب دریچه‌های یک گلخانه را باتوجه به موقعیت جغرافیایی منطقه در جهت بهبود گردش هوا و کاهش مصرف انرژی، مشخص نمود.

نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که با کنترل بهینه دما، رطوبت، آبیاری، انرژی و هزینه مصرفی، هدف جامعه محققین کشاورزی که دستیابی به توسعه پایدار کشاورزی است، دست‌یافتنی است (Taki *et al.*, 2018; Ahmed *et al.*, 2019; Bolandnazar, Sadrnia, Rohani, & Taki, 2019; Taki, Ajabshirchi, Ranjbar, Rohani, & Matloobi, 2016b). بنابراین با طرح مدل‌هایی از گلخانه که بتواند موارد بالا را شبیه‌سازی کند به‌ویژه در زمینه مصرف انرژی، می‌توان گلخانه را محیطی قابل تفسیر و پیش‌بینی توصیف کرد. به بیان دیگر شناخت رفتار حرارتی عناصر داخلی و بیرونی گلخانه، پیش‌بینی میزان مصرف انرژی را راحت‌تر می‌کند. یکی از سازه‌هایی که به‌صورت خاص در شرایط آب و هوایی گرم یا سرد ساخته می‌شود، سازه‌های شیشه‌ای مدفون در خاک هستند. در مورد این نوع سازه‌ها و میزان تبادلات انرژی بین محیط بیرون و داخل آن‌ها تحقیقاتی بسیار اندک و بیشتر به‌صورت معرفی صورت گرفته است. لذا هدف این تحقیق بررسی جریان انرژی در یکی از این نوع سازه‌های واقع شده در محل دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان است. در این تحقیق، حل عددی CFD به منظور بررسی جریان انرژی داخل گلخانه و مشخص کردن سهم هدررفتی تمام عناصر داخلی گلخانه به‌کار رفته است. در این راستا از سنسورهای نور، دما و رطوبت به‌منظور برآورد مقادیر دقیق هریک از ورودهای مدل استفاده شد. نتایج این تحقیق می‌تواند به راحتی گرادیان دما در نقاط مختلف گلخانه را مشخص کند و در آینده به منظور هوشمند کردن گلخانه‌ها و برآورد میزان تلفات انرژی در نقاط مختلف گلخانه مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

محل تحقیق، نوع گلخانه و نحوه داده‌برداری

این تحقیق به منظور شبیه‌سازی شرایط داخلی یک گلخانه نیمه-دوطرفه شیشه‌ای با جهت قرارگیری شرقی- غربی با توجه به شرایط آب و هوایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان واقع در شهر ملاثانی در ۳۵ کیلومتری شمال اهواز انجام شد. گلخانه مورد بررسی، دارای ساختاری ویژه است که به دلیل قرارگیری در عمق بیش از یک متری سطح زمین در مناطق بسیار گرم یا بسیار سرد مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساختار این گلخانه به‌منظور کاهش تابش خورشید به داخل گلخانه و کمک گرفتن از دیواره‌ها در جهت جذب انرژی انباشته است و به‌صورت مدفون در عمق ۱/۸ متری سطح زمین قرار دارد. گلخانه مورد نظر دارای مساحت ۳۸ مترمربع و حجم هوای ۸۷/۸ مترمکعب است. ابعاد گلخانه در جدول ۱ آورده شده است. داده‌های دما و رطوبت از داخل و بیرون گلخانه مورد نظر توسط حسگرهای دما (مدل SHT 11 ساخت شرکت CMOS آمریکا) و داده‌های تابش در داخل گلخانه، در یک سطح تراز شده زمین، توسط تابش‌سنج مدل TES132 برداشت شد. این نوع تابش‌سنج قادر است داده‌های تابش در محدوده طول موج ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر برداشت کند. داده‌های سرعت جریان هوا از ایستگاه هواشناسی واقع در دانشگاه استخراج گردید. داده‌برداری از ۱۸ تا ۲۱ آذرماه سال ۱۳۹۹ در چهار روز متوالی و به مدت ۸ ساعت یعنی همزمان با طلوع و غروب خورشید انجام گرفت.

نحوه چیدمان حسگرهای دما به نحوی بود که دو حسگر در کف (یکی در وسط دیواره شرقی و دیگری در وسط دیواره غربی) قرار گرفتند و دما و رطوبت کف گلخانه را ثبت می‌کردند. دو حسگر در دیواره جنوبی نصب شدند که یکی در ارتفاع یک متر از کف گلخانه روی قسمت مدفون دیواره و دیگری در ارتفاع دو متری روی جداره شیشه‌ای دیواره نصب شد و به‌منظور اجتناب از تأثیر تابش مستقیم بر دمای ثبت شده حسگر، پوشش سایه‌بانی روی آن قرار داده شد. دو حسگر دما روی دیوار شمالی نصب شدند که مانند حسگرهای نصب شده بر دیوار جنوبی یکی در ارتفاع یک متری، دما و رطوبت بخش مدفون دیوار را ثبت می‌کرد و دیگری در ارتفاع دو متری دمای دیوار شیشه‌ای شمالی را ثبت می‌کرد. همچنین، داخل گلخانه نیز یک حسگر در ارتفاع یک‌متری از کف گلخانه با فاصله دو متری از دیوار شمالی و دیگری در ارتفاع دو متری از کف و با فاصله ۲/۴ متری از دیوار جنوبی نصب شد. ثبت دمای بیرون نیز توسط یک حسگر SHT11 انجام گرفت. تمامی حسگرهای نصب شده به‌صورت بی‌سیم، داده‌های دما و رطوبت را در بازه زمانی ده ثانیه‌ای ضبط و ارسال می‌کردند. شکل ۱–الف، نمای بیرونی گلخانه مورد نظر و شکل ۱–ب، محل نصب سنسورهای دما را نشان می‌دهند.

شبیه‌سازی

به منظور بررسی چگونگی توزیع دما و جریان هوا داخل گلخانه از روش دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شد. این روش مبتنی بر حل معادلات پیوستگی (رابطه ۱)، اندازه حرکت (رابطه ۲) و انرژی (رابطه ۳) به شرح زیر است (Saberian & Sajadiye, 2019):

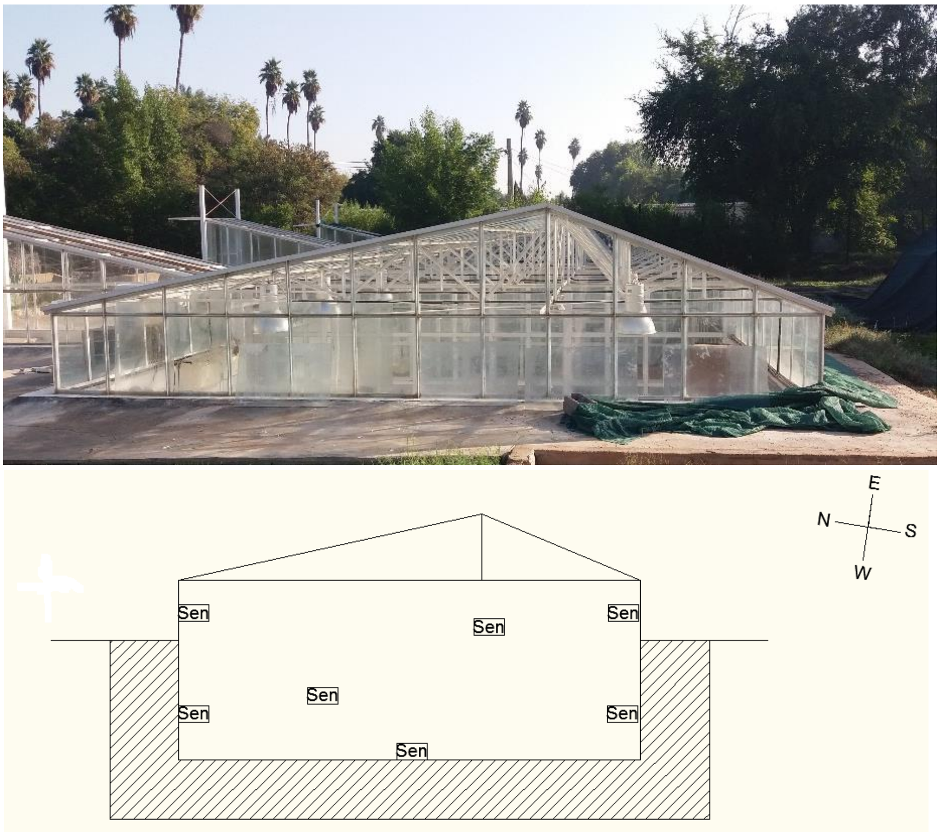
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho\vec{V}) = 0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla.(\rho\vec{u}\vec{V}) = -\nabla P + \nabla(\tau_{eff}) + \rho\vec{f} \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla.[\vec{V}(\rho E + P)] = \nabla.\left[k_{eff}\nabla T - \sum_{J} h_j\vec{J}_j + (\tau_{eff}\vec{V}_j)\right] + S_h \qquad (۳)$$

که در آن‌ها، ρ میزان چگالی هوا ($kg.m^{-3}$)، v سرعت جریان هوا (ms^{-1})، t زمان (s)، P فشار (pa)، τ_{eff} تنش برشی مؤثر ($N.m^{-2}$)، f شتاب‌های مربوط به نیروهای حجمی (ms^{-2})، u بردار سرعت در مختصات کارتزین (ms^{-1})، E انرژی جریان (N.m)، k_{eff} ضریب انتقال حرارت مؤثر ($Wm^{-1}K^{-1}$)، T دما (K)، h_j آنتالپی محسوس (Jkg^{-1})، J_j شار پخشی (Wm^{-2}) و S_h منبع گرمایی حجمی است (Saberian & Sajadiye, 2019).

A



B

شکل ۱– نمای بیرونی گلخانه و محل سنسورهای دما (A و B)

Fig.1. Exterior view of the greenhouse and the location of temperature sensors

جدول ۱– مشخصات گلخانه مورد مطالعه

Table 1- Specifications of the studied greenhouse

مشخصات **Specifications**	مقدار **Value**
عرض Width	7.06 m
طول Length	5.40 m
ارتفاع دیوار مدفون در خاک height of the wall buried in the ground	1.80 m
ارتفاع جدار شیشه‌ای The height of the glass wall	0.90 m
فاصله سقف گلخانه از کف در بلندترین نقطه The distance of the greenhouse ceiling from the floor at the highest point	3.70 m
مساحت Area	38 m^2
حجم Volume	87.8 m^3

شبیه‌سازی به‌صورت گذرا از ساعت ۸:۳۰ تا ۱۶:۳۰ برای ۲۰ آذر ۱۳۹۹ با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent نسخه 2020 R2 صورت گرفت. در این تحقیق، گام زمانی ۱۰ دقیقه، الگوریتم simple برای کوپلینگ معادلات سرعت و فشار، حلگر بر مبنای فشار و ۳۲۶۰۳۰ المان چهار وجهی (tetrahedral) در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی به صورت گذرا از ساعت ۸:۳۰ تا ۱۶:۳۰ برای ۲۰ آذر ۱۳۹۹ با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent نسخه 2020 R2 صورت گرفت. گام زمانی ۱۰ دقیقه، الگوریتم simple در حلگر و ۳۲۶۰۳۰ المان چهاروجهی (tetrahedral) استفاده شد. همچنین استقلال از شبکه برای نشان دادن عدم وابسته بودن نتایج شبیه‌سازی به شبکه بررسی شد که در بخش نتایج به آن پرداخته می‌شود. برای شبیه‌سازی جریان هوا داخل گلخانه از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده شد (Santolini *et al.*, 2018). شرایط مرزی در بخش‌های مختلف گلخانه عبارتند از: ۱. تبادل حرارت دیوارهای شمالی، جنوبی، شرقی و غربی با خاک، ۲. تبادل حرارت کف گلخانه با زمین ۳. تبادل حرارت هدایتی از سقف و همرفت اطراف گلخانه با بیرون به واسطه وزش باد و در نهایت تابش خورشید. برای مورد اول و دوم از قانون فوریه (رابطه ۴) استفاده شد (Bergman, Incropera, Lavine, & Dewitt, 2011):

$$q'' = k\,\frac{\Delta T}{L} \qquad (۴)$$

که در آن q'' شار حرارتی (Wm^{-2})، k ضریب انتقال حرارت هدایت (WmK^{-1})، T دما (K) و L طول (m) است. مقدار ضریب انتقال حرارت هدایت برای خاک به‌طور متوسط ۰/۵۲۵ وات بر مترمربع درجه کلوین در نظر گرفته شد (Abu-Hamdeh & Reeder, 2000). دمای دیواره‌ها با حسگر در طول آزمایش اندازه‌گیری شدند. همچنین دمای متوسط خاک از سطح زمین تا عمق یک متری ۱۷/۴۲ و دمای عمق یک متری زمین ۲۱/۸ درجه سلسیوس اعمال شد. با داشتن تفاوت دما می‌توان مقدار شار حرارتی از کف و دیوارها را به‌دست آورد.

برای تعیین مقدار ضریب انتقال حرارت همرفتی (بر حسب $Wm^{-2}K^{-1}$) از رابطه (۵) استفاده شد (Roy, Boulard, Kittas, & Wang, 2002):

$$2.8+1.2V \qquad (۵)$$

V در این معادله سرعت جریان باد (ms^{-1}) است.

در نهایت چگونگی توزیع دمای داخل گلخانه با استفاده از شبیه‌سازی، محاسبه شد و مقادیر آن در دو نقطه: یکی در ارتفاع ۱ متری و دیگری در ارتفاع ۲ متری با اندازه‌گیری‌های واقعی مقایسه گردید. برای ارزیابی توانمندی مدل و مقایسه نتایج آن با مقادیر واقعی برداشت شده توسط حسگرها، از شاخص‌های عملکردی میانگین مطلق درصد خطا (MAPE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده (R^2) استفاده شد:

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_a - y_p\right)^2}{n}} \qquad (۶)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_a - y_p\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(y_a - \bar{y}_a\right)^2} \qquad (۷)$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_a - y_p}{y_a}\right| \times 100 \qquad (۸)$$

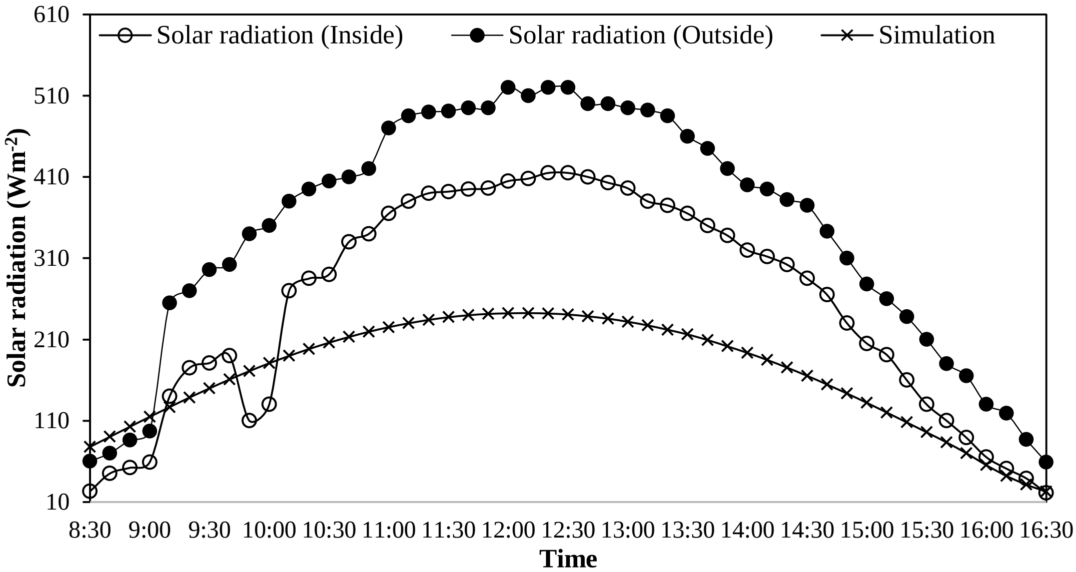
که در آن، y_a و y_p به‌ترتیب مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده مدل و $\bar{y}_a$ و $\bar{y}_p$ به‌ترتیب مقادیر میانگین آن‌ها هستند. بهترین عملکرد مدل‌ها، زمانی به‌دست می‌آید که معیارهای خطا شامل (MAPE و RMSE) حداقل و معیار عملکردی R^2 حداکثر و نزدیک به یک باشد. علاوه بر این موارد، برای ارزیابی توافق بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده از خط رگرسیونی ($y_a = a + by_p$) بین آن‌ها نیز استفاده شد. بر اساس این معیار، بهترین حالت زمانی است که شیب خط نزدیک به یک ($b \cong 1$) و عرض از مبدأ ($a \cong 0$) آن نیز نزدیک به صفر باشد (Taki *et al.*, 2018).

نتایج و بحث

مهم‌ترین مؤلفه تأثیرگذار بر دینامیک گلخانه مورد مطالعه، پرتوهای تابش خورشید است. وجود گلخانه در عمق خاک میزان پرتوهای تابش شده به داخل محیط را کاهش خواهد داد. در بهترین حالت تابش (موقع ظهر) که خورشید در بالاترین حالت خود در آسمان قرار دارد، ۱۴ متر مربع از کف گلخانه و دیوار جنوبی همواره از دریافت پرتو مستقیم خورشید محروم می‌باشد. بنابراین میزان پرتوهای ورودی به داخل گلخانه به نسبت زمانی که گلخانه بر روی زمین قرار دارد نزدیک به ۴۰٪ کمتر است. همچنین زمانی که گلخانه روی سطح زمین قرار دارد دمای بخش بیرونی دیواره‌ها، دمای محیط است که در مناطق گرم و مخصوصا طول روز از دمای درون خاک و یا دیواره‌های مدفون بیشتر است و همین مسأله باعث می‌شود که یا شار جریان حرارت به سمت بیرون گلخانه کاهش یابد و یا تغییر شار به سمت داخل در مواقعی که دمای داخل کم‌تر از دمای محیط است را داشته باشیم.

بنابراین اولین پارامتری را که باید بررسی کرد میزان افزایش

انرژی ناشی از تابش و بررسی تأثیر آن بر روابط و پارامترهـای مـؤثر داخل گلخانه خواهد بود. شکل ۲، میزان تابش خورشـید در بیـرون و داخل گلخانه موردنظر همراه با نتیجه شبیه‌سـازی تـابش خورشـید در کف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲، میزان تابش تـا سـاعت ۱۰ صبح به‌واسطه وجود درختان در شرق گلخانه و سایه‌اندازی آن‌ها، کم است و مقدار شبیه‌سازی تا ساعت ۹ صبح از مقادیر اندازه‌گیری شـده بیشتر می‌باشد. طبق اندازه‌گیری‌های انجام شده، تفـاوت بـین میـزان شدت تابش بیرون و داخل گلخانه با توجه به درصد جـذب، انتقـال و انعکاس پرتوهای خورشـیدی توسـط سـطح شـفاف سـقف گلخانـه و انعکاس بخشی توسط سازه و همچنین جذب توسط ذرات گرد و خاک سطح رویی گلخانه منطقی به نظر می‌رسد. مقدار تابش به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده در کف، کم‌تر اسـت زیـرا در شبیه‌سازی، میانگین تابش در کل کف محاسـبه شـده کـه شـامل بخش‌های آفتاب‌گیر و همچنین بخش‌های سـایه اسـت درحـالی کـه مقدار تابش اندازه‌گیری شده داخل، میـانگین چنـد نقطـه آفتـاب‌گیـر می‌باشد. مقایسه نتایج تابش روی سطح افق با تابش کف گلخانه کـه سایه‌اندازی نیز در آن لحاظ شده است، نشان می‌دهد میزان تـابش در کف به صورت میانگین ۴۶/۷ درصد کم‌تر اسـت. ایـن مطلـب بـرای مناطق گرمسیر بسیار مهم است و باعث صـرفه‌جـویی مصـرف بـرق به‌منظور کاهش دمای داخل گلخانه در فصل گرم سال می‌شود.

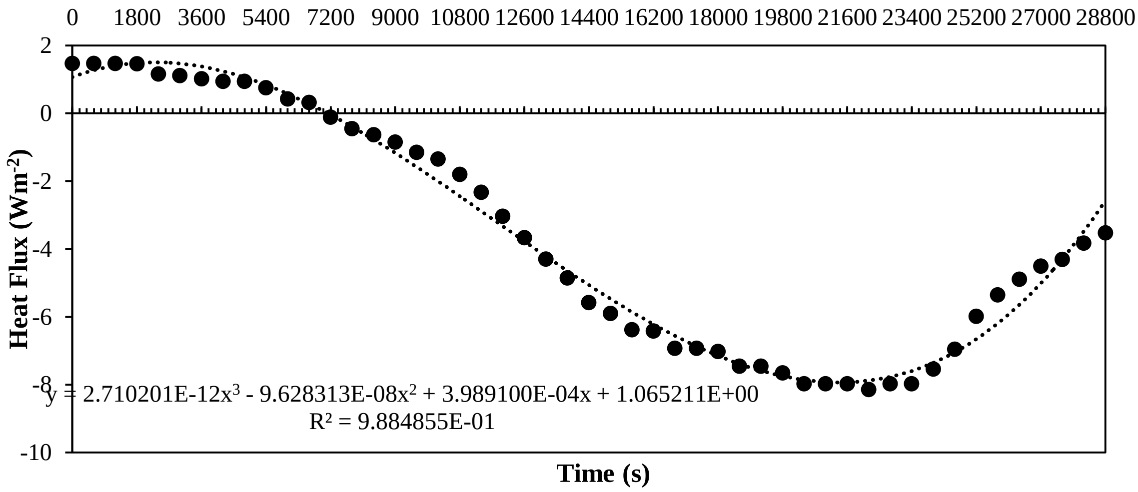


شکل ۲– تابش خورشیدی روی سطح زمین، کف گلخانه و شبیه‌سازی شده مربوط به ۲۰ آذر ۱۳۹۹

Fig.2. Solar radiation on the ground, greenhouse floor and simulated related to 10.12.202

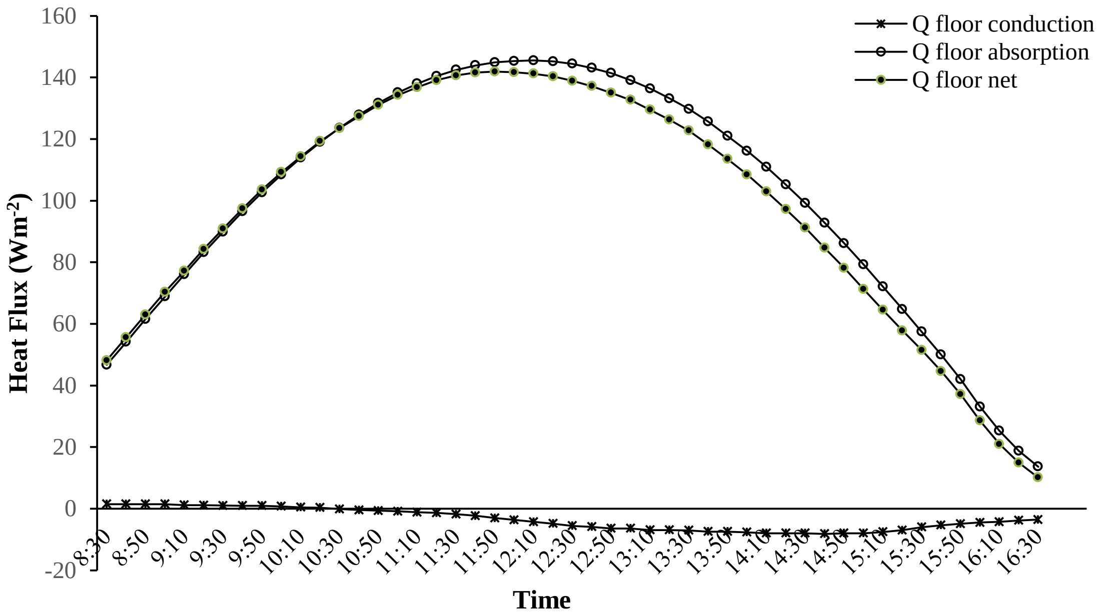
شار حرارتی کف گلخانه تا زمانی که دمای محیط داخل کم‌تـر از دمای عمق خاک باشد به سمت داخل گلخانـه خواهـد بـود و پـس از دریافت انرژی حرارتی ناشی از تابش و بالا رفتن دمـای کـف، جهـت شار حرارتی به سمت عمق خاک تغییر خواهد کرد و بخـش دیگـر آن سبب افزایش دمای محیط داخل خواهد شد. تناسب رفتار حرارتـی در گلخانه مورد آزمایش با انتظارات تئوری مطابقت دارد. همان‌طـور کـه نتایج شکل۳ نشان می‌دهد، شار حرارتی از عمق خاک به سمت داخل تا ساعت ۱۰:۳۰ صبح (معادل ۷۲۰۰ ثانیه در نمـودار) (زمـان هـم‌دمـا شدن کف گلخانه و عمق خاک) از سمت عمق خاک به داخل گلخانه و پس از آن جهت جریان حرارتی برعکس است. این مسأله در مناطق گرم که با مشکل انباشتگی انرژی حرارتی در داخـل گلخانـه روبـه‌رو هستند، یک مزیت به حساب می‌آید و با افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی (انتخاب مصالح مناسب با ضریب انتقال حرارت بالا) می‌تـوان بخش قابل‌توجهی از انرژی انباشته درون گلخانـه را بـه کمـک ایـن سیستم که خود نوعی از سیستم سرمایش غیرفعال به حساب می‌آیـد، در عمق خاک مستهلک کرد.

باید این مسأله را هم در نظر داشت که چـون همـواره بخشـی از مساحت کف گلخانه از دریافت پرتوهای تابش مستقیم محروم اسـت، به‌عنوان منبع دریافت گرما عمل کرده و همراه با دیواره جنـوبی منبـع خوبی برای مستهلک کردن گرمای انباشته به حساب می‌آینـد. جهـت حرکت جریان هدایت حرارتی کف گلخانه پس از سـاعت ۱۰:۳۰ کـه هم‌دمایی کف و عمق خاک اتفاق می‌افتـد بـه سـمت قسـمت سـایه گلخانه هدایت پیدا می‌کند. این مسأله در مدت زمان تـابش خورشـید به کف گلخانه باعث حرکت جریان انـرژی بـه سـمت دیـوار جنـوبی می‌گردد.



شکل ۳– شار حرارت هدایت شده تبادل شده در کف گلخانه

Fig.3. Conducted heat flux on the floor of the greenhouse



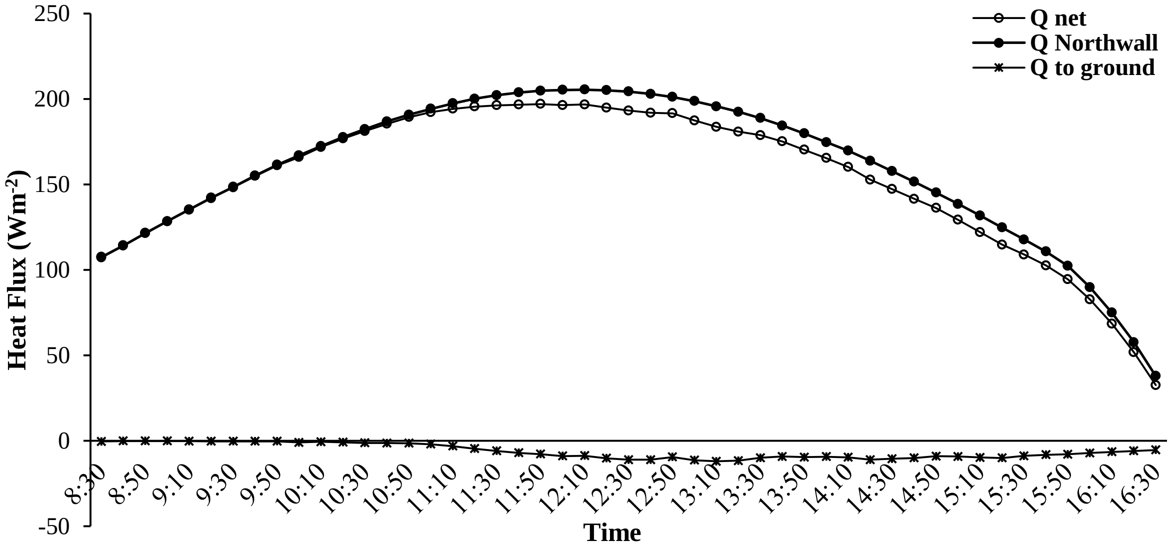
شکل ٤– میزان شار حرارتی تبادل شده در کف گلخانه، تابش جذب‌شده خورشید و تفاوت آن‌ها

Fig.4. Heat flux exchanged in the greenhouse floor, the absorbed radiation and their differences

شکل ۴، میزان شار ناشی از تابش خورشید در کف گلخانه و همچنین میزان شار حرارتی تبادل شده با عمق خاک را نمایش می‌دهد. شار حرارتی جریان هدایت به سمت عمق در مقایسه با شار جریان همرفت و تابش بسیار ناچیز می‌باشد که موجب افزایش دما بیش از توان تحمل گیاه خواهد بود. بیشترین میزان شار حرارتی به سمت عمق خاک مربوط به ساعت ۱۴:۴۰ (۲۲۲۰۰ ثانیه) می‌باشد که بیشترین تفاوت دما بین عمق خاک و کف گلخانه را دارا است. در عین حال افزایش دمای کف، جهت جریان انرژی به سمت محیط داخل گلخانه را هم افزایش می‌دهد که از آن گریزی نیست.

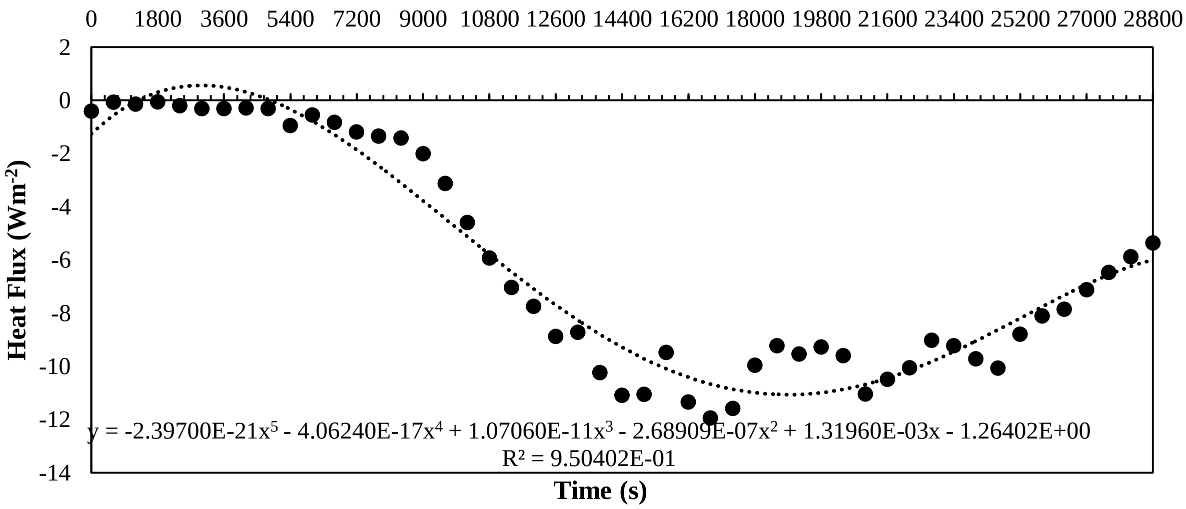
تنها راه کاهش جریان حرارت ورودی به محیط، افزایش سرعت انتقال حرارت به سمت عمق خاک تا حد ممکن و کاهش ورود پرتوهای گرمازا به داخل گلخانه می‌باشد. تغییرات دما در دیواره شمالی و جنوبی و همچنین ساختار وجودی آن (نصب گلخانه در عمق خاک) از آن منبع مناسبی جهت جذب انرژی انباشته داخل گلخانه ساخته است. این مسأله در مورد دیواره شمالی به‌واسطه دریافت بیشتر انرژی عینیت بیشتری دارد زیرا مطابق شکل‌های ۵ و ۶، بیشترین

میزان دریافت شار در دیواره شمالی در ساعت ۱۳:۱۰ برابـر بـا ۱۱/۹۵ وات بر مترمربع است که ناشی از بالاترین حد اختلاف دمـا در دیـواره شمالی است؛ در حالی که در دیوار جنوبی بیشترین دریافت شار مطابق شکل ۷، در ساعت‌های ۱۲:۵۰ تا ۱۵:۱۰ برابر با ۵/۵۵ وات بر مترمربع است.



شکل ۵- شار حرارتی دیوار شمالی ناشی از تابش خورشید، شار تبادل شده با خاک و تفاوت آن‌ها

Fig.5. The heat flux of the north wall caused by sunlight, heat exchanged with the soil and their differences



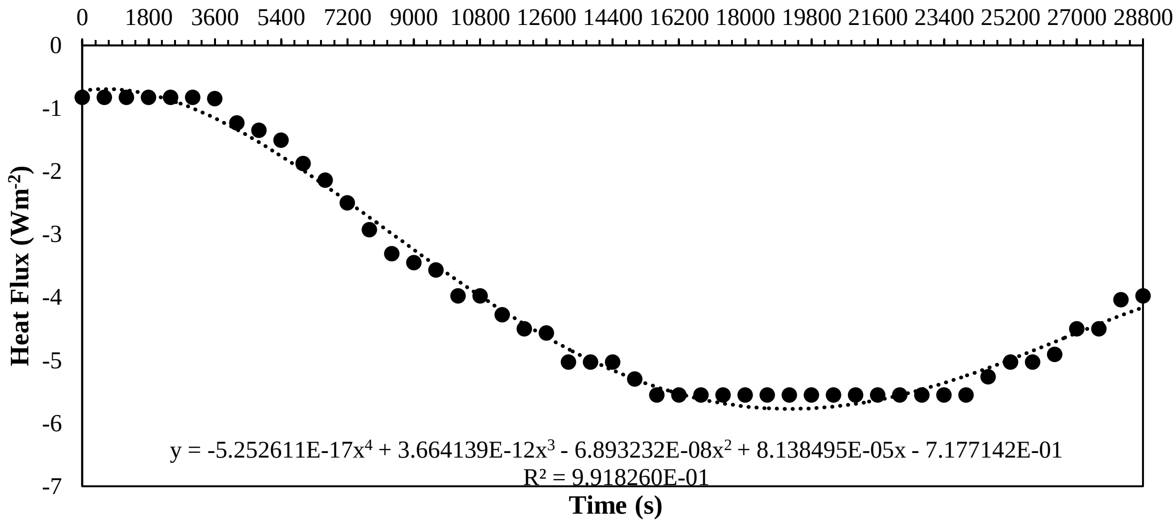
شکل ٦- شار حرارتی تبادل شده در دیواره شمالی

Fig.6. Heat flux exchanged in the north wall

باید خاطر نشان کرد که عمده‌ترین عامـل تغییـرات شـار حـرارت هدایت، مربوط به اختلاف دما در دو سوی یک جسم می‌باشد. دیـواره جنوبی به‌واسطه عدم دریافت پرتوهای تابشی از ثبات دمایی بیشـتری در مقایسه با دیگر نواحی گلخانه برخوردار اسـت و تغییـرات آن تنهـا ناشی از تغییرات دمای هوای مجاور از طریـق همرفـت و کمـی هـم تابش غیرمستقیم محیط است. بیشترین شار حرارتی ناشی از تابش در کف مربوط به ساعت ۱۲:۲۰ ظهر و برابر با ۱۴۵/۴۸ وات بر مترمربـع است اما بیشترین میزان شار حرارتی به سمت عمق خاک مربـوط بـه سـاعت ۱۴:۵۰مـی‌باشـد (۸/۱۵ وات بـر مترمربـع) کـه سـبب ایجـاد بیشترین تفاوت دما بین عمـق خـاک و کـف گلخانـه (۱۵/۵۲ درجـه

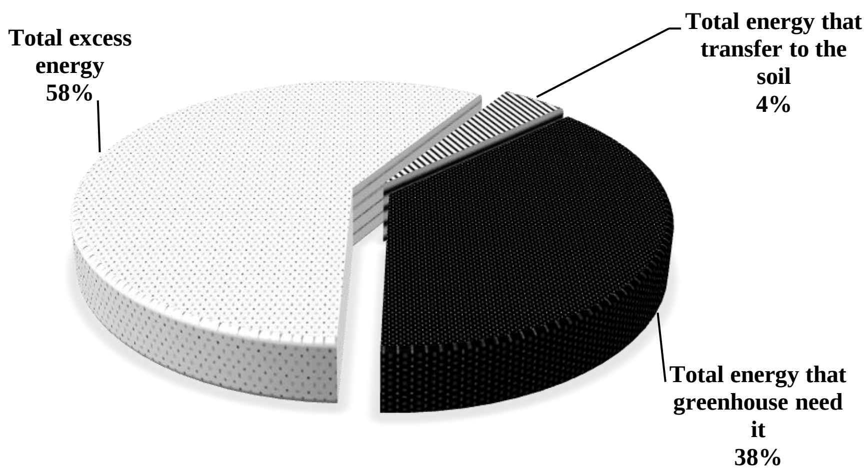
سلسیوس) شده است. این تفاوت مربوط به مدت‌زمانی است که طول می‌کشد تا دمای کف با توجه به افزایش تابش خورشید، افزایش یابد. در عین حال افزایش دمای کف، میزان جریان انرژی به سمت محیط داخل گلخانه را هم افزایش می‌دهد که از آن گریزی نیست. تنها راه کاهش جریان حرارت ورودی به محیط، افزایش سرعت انتقال حرارت به سمت عمق خاک تا حد ممکن و کاهش ورود پرتوهای گرمازا به داخل گلخانه می‌باشد. از آنجا که آستانه تحمل دمایی گیاه بین ۱۰ تا ۲۸ درجه سلسیوس است مقدار انرژی ورودی به گلخانه تا زمانی که به این دامنه دمایی برسد قابل‌قبول است و بیشتر از آن باعث کاهش تولید و آسیب به گیاه می‌گردد (Dayioğlu & Silleli, 2015). بنابراین زمانی که دمای داخل گلخانه بیش از ۲۸ درجه سلسیوس باشد، انرژی منتقل‌شده از کف و دیوار شمالی به هوا به‌عنوان انرژی انباشته و مضر داخل گلخانه به حساب می‌آید.

شکل ۸، سهم هر بخش از انرژی ایجادشده در گلخانه را مشخص کرده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، بیشترین سهم مربوط به تولید انرژی انباشته مضر ۹۱۹۸۹/۷ کیلوژول (۵۸٪) و کمترین مربوط به انرژی حرارتی منتقل شده در کف است (۶۷۷۹/۴ کیلوژول معادل ۴ درصد کل انرژی) است. نتایج این شکل، ضرورت مستهلک کردن انرژی انباشته تا رسیدن به دمای مطلوب گیاه را به‌خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۷– شار حرارتی تبادل شده در دیواره جنوبی

Fig.7. Heat flux exchanged in the south wall



شکل ۸– کل انرژی تولیدی از تابش نور خورشید در گلخانه

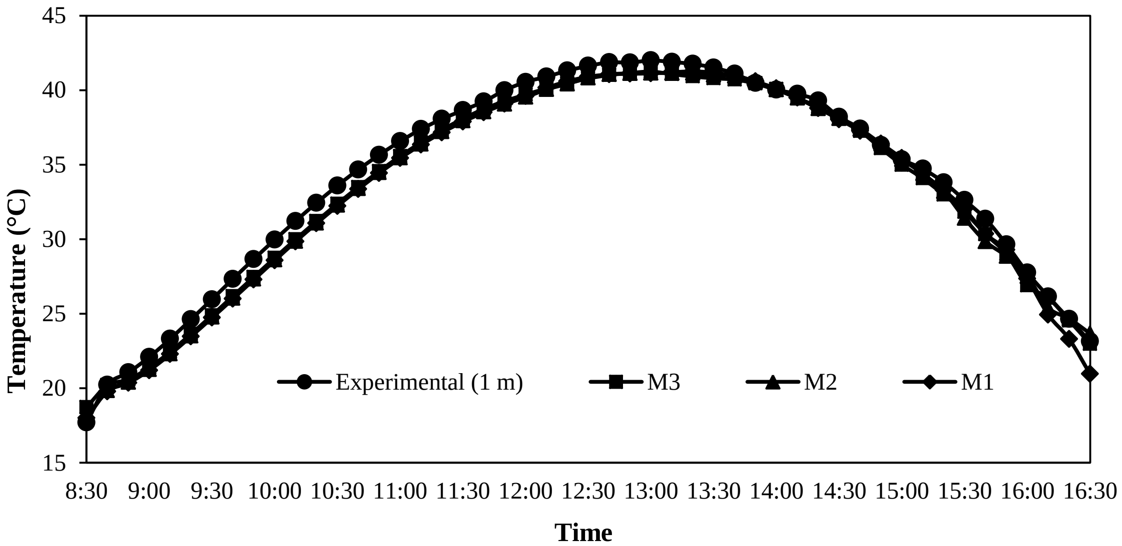
Fig.8. Total energy produced by sunlight in the greenhouse

نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری توسط حسگرهای دما در ارتفاع ۱ و ۲ متری سطح گلخانه در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. با بررسی شکل‌های مذکور می‌توان به این نتیجه رسید که شبیه‌سازی به‌خوبی در هر دو ارتفاع توانسته است دمای هوای داخل گلخانه را تخمین بزند. در این شکل‌ها به‌ترتیب M1، M2 و M3 متناظر با ۱۳۵۱۰۴، ۱۸۳۲۶۳ و ۳۲۶۰۳۰ المان چهار وجهی است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با تغییر تعداد المان‌ها، نتایج چندان تغییر نمی‌کنند که مبین استقلال نتایج از شبکه است. لذا ارائه نتایج بر مبنای ۳۲۶۰۳۰ المان صورت گرفت که در بین بقیه تعداد المان‌ها از خطای کمتری برخوردار بود.

جدول ۲ شاخص‌های عملکردی برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی و مقادیر واقعی اندازه‌گیری دما در ارتفاع ۱ و ۲ متری برای حالت M3 را نشان می‌دهد که حاکی از سازگاری و دقت خوب شبیه‌سازی کامپیوتری است. در تحقیقی بر روی گلخانه شیشه‌ای ونلو در دانشگاه هامبولت شهر برلین با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی فلوئنت، میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE= ۱/۶۱) درجه کلوین در مقاطع عمودی گزارش شد (Dayioğlu & Silleli, 2019). در پژوهش دیگری، که در گلخانه خورشیدی در دانشگاه کشاورزی مانگولیا چین با پوشش دولایه فیلم پلی‌اتیلن و با کمک نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی صورت گرفت، میانگین ریشه مربعات خطا معادل ۰/۵۱ درجه سلسیوس در ارتفاع یک متری گزارش شدند (Jiao *et al.*, 2020). در گزارش دیگری نیز میانگین ریشه مربعات خطا روش CFD مورد استفاده در گلخانه پلاستیکی گنبدی شکل، ۰/۹۱ درجه سلسیوس ثبت شد (Munar & Aldana, 2019) که همگی حکایت از نزدیکی نتایج ارزیابی این مطالعه با تحقیقات محققین ذکر شده دارد.

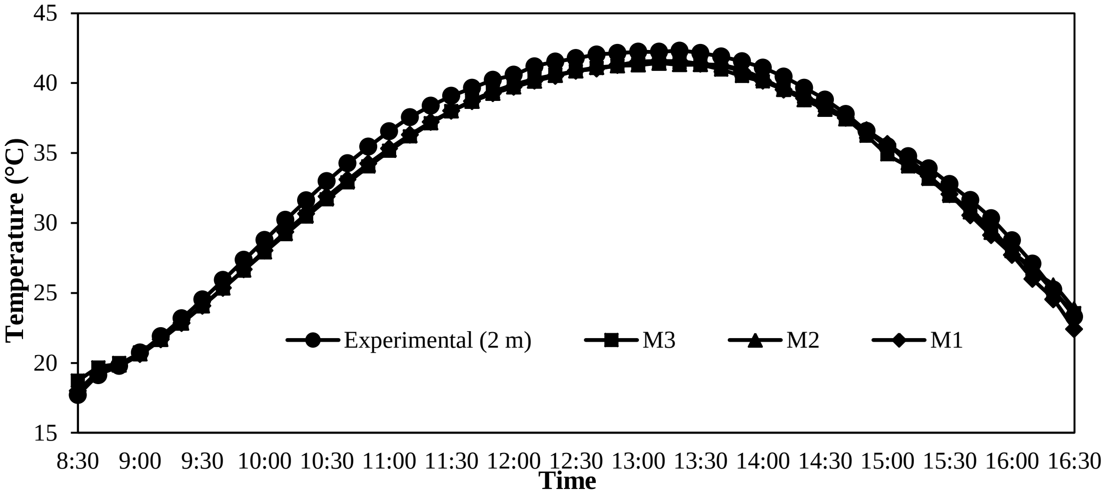
همان‌طور که شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهند، بیش‌ترین دما در ارتفاع یک متری مربوط به ساعت ۱۳:۰۰ و برابر با ۴۱/۹۸ درجه سلسیوس است که بیشتر از تحمل گیاه می‌باشد. این مسأله در مورد ارتفاع دو متری هم صادق است.

مهم‌ترین مورد قابل‌توجه شکل‌های ۹ و ۱۰ این است که از ساعت ۱۰:۳۰ نیاز به هدایت گرما از داخل گلخانه به بیرون تا ساعت ۱۵:۳۰ وجود دارد. این در حالی است که زمان آزمایش در فصل سرد سال قرار داشت و در بقیه فصل‌های سال شدت پرتوهای تابش بیش‌تر بوده و نیاز انرژی سرمایش قاعدتاً بیشتر خواهد شد. یعنی این گلخانه در بهترین حالت در مواقع تابش مداوم خورشید نیاز به خارج کردن حداقل ۹۱۹۹۰ کیلوژول انرژی از درون خود دارد. به بیان دیگر می‌توان گفت که با اتخاذ روشی باید مانع از ورود این مقدار گرما از طریق تابش به داخل گلخانه شد. روند تغییرات دما و جریان هوا در مقطع افقی و ارتفاع یک متری و در مقطع عمودی در ساعات مختلف روز در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نمایش داده شده است.



شکل ۹- مقایسه نتایج اندازه‌گیری واقعی و شبیه‌سازی دمای داخل گلخانه در ارتفاع یک متری با المان‌های مختلف (M1، M2 و M3 متناظر با ۱۳۵۱۰۴، ۱۸۳۲۶۳ و ۳۲۶۰۳۰ المان است)

Fig.9. Comparison of recorded and simulated temperature data at a height of one meter with different meshes (M1=135104, M2=183263, M3=326030)



شکل ۱۰- مقایسه نتایج اندازه‌گیری واقعی و شبیه‌سازی دمای داخل گلخانه در ارتفاع دو متری با المان‌های مختلف (M1، M2 و M3 متناظر با ۱۳۵۱۰۴، ۱۸۳۲۶۳ و ۳۲۶۰۳۰ المان است)

Fig.10. Comparison of recorded and simulated temperature data at a height of two meter with different meshes (M1=135104, M2=183263, M3=326030)

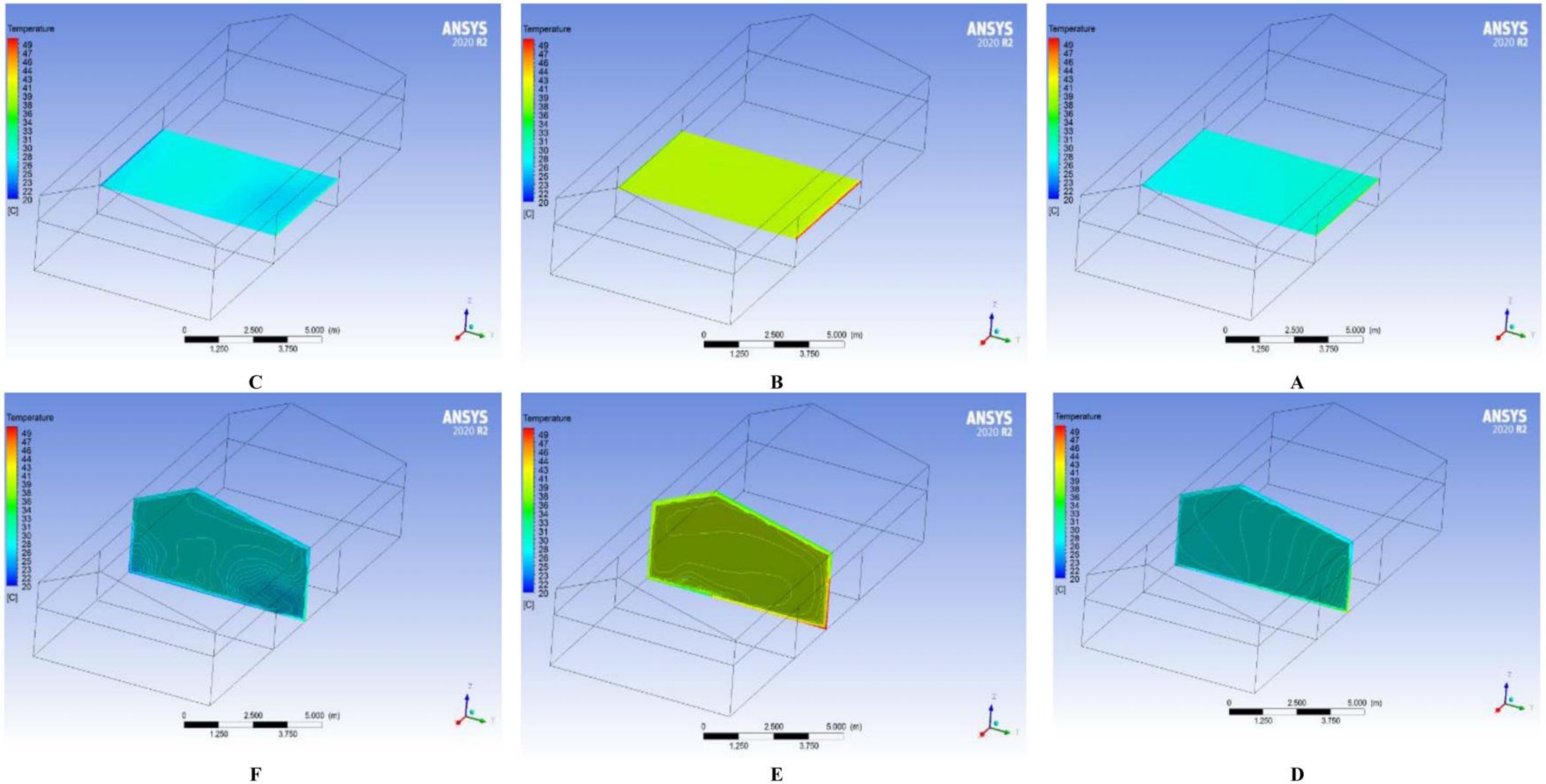
جدول ۲- شاخص‌های میانگین مطلق درصد خطا (MAPE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) در تخمین دمای داخل گلخانه در ارتفاع‌های ۱ و ۲ متری با ۳۲۶۰۳۰ المان

Table 2- Performance indices; Mean Absolute Percentage Error (MAPE), Root Mean Square Error (RMSE) and coefficient of determination (R^2) for temperature prediction in 1 and 2 heights with 326030 meshes

ارتفاع داده‌برداری Height of data record	MAPE (%)	RSME (°C)	R^2
۱ متری 1m	2.17	0.789	0.987
۲ متری 2m	2.28	0.852	0.987

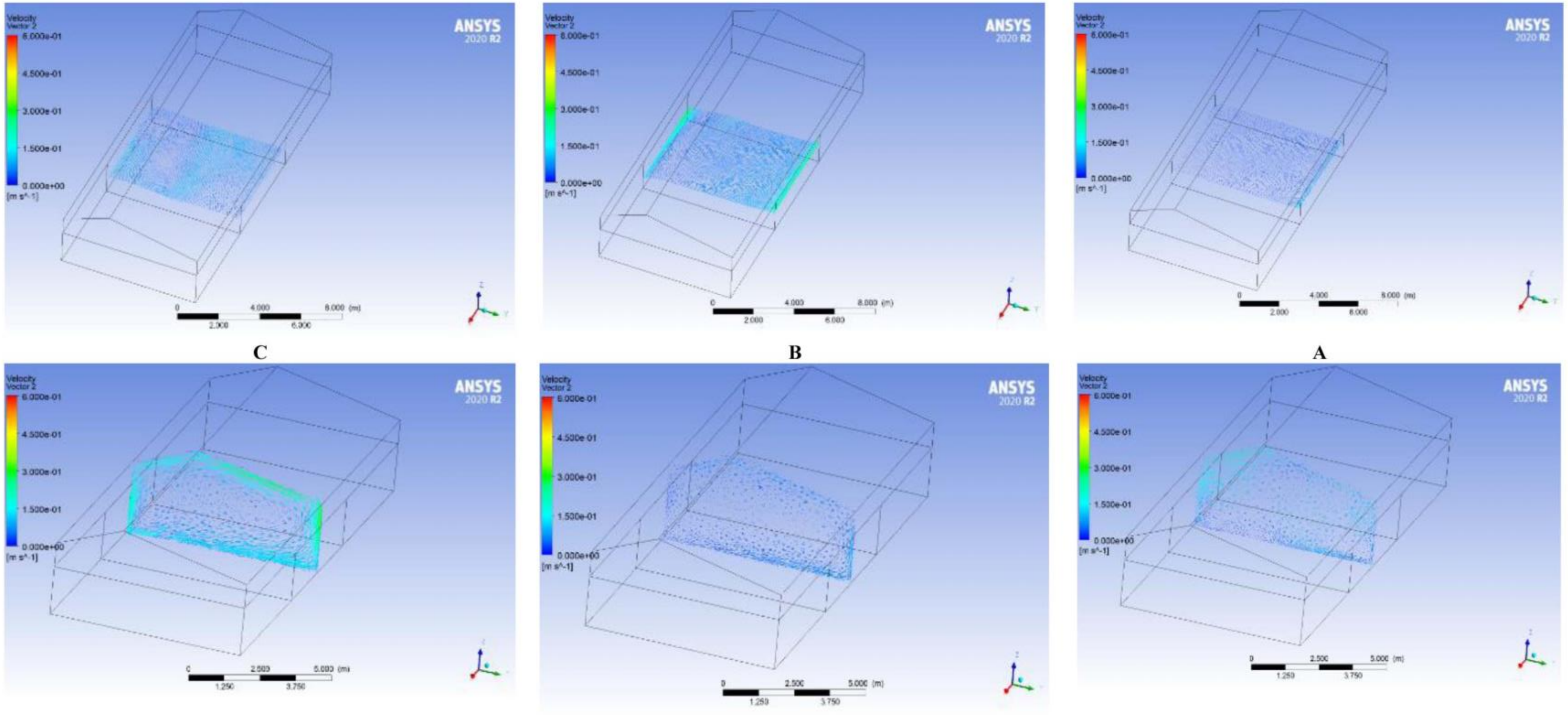
همچنان که انتظار می‌رفت، بیش‌ترین دما مربوط به نواحی نزدیک به دیواره شمالی است که از ساعت ۱۰صبح تا پایان زمان آزمایش همواره در معرض تابش خورشید قرار دارد. وجود جریان همرفتی هوای بیرون گلخانه با سقف، دمای پایین نواحی نزدیک به سقف را توجیه می‌کند. کم‌ترین دما در ارتفاع یک‌متری مربوط به نواحی نزدیک به دیواره جنوبی است. در ساعت ۱۲، بیش‌ترین دما در نزدیکی دیواره شمالی رخ می‌دهد، در حالی‌که با گذشت زمان و رسیدن به ساعت ۱۶، محدوده نزدیک به دیواره شمالی خنک‌تر از نواحی مرکزی گلخانه است. تصویر دمایی ساعت ۱۲ مقطع عمودی و افقی حاکی از نامناسب بودن گلخانه برای رشد گیاه است.

همچنان که نتایج شکل ۱۱ تغییرات دمایی در مقطع عمودی را نشان می‌دهد، تراکم خطوط هم‌دما در دیواره‌های مرزی بیش‌تر است و نواحی نزدیک به مرکز گلخانه یکنواختی بیش‌تری از نظر دما و چگالی تجربه می‌کنند. میزان این تغییرات در نزدیکی دیواره جنوبی با گذشت زمان بیش‌تر می‌شود که وجود سایه در این محل را توجیه می‌کند. از آن‌جایی که هوای داخل گلخانه حین انجام آزمایش محبوس بود و ورودی و خروجی جریان هوا وجود نداشت، بنابراین تنها عامل حرکت هوا داخل گلخانه، افزایش دمای هوای مجاور سطوح و در نتیجه تغییر چگالی و وقوع پدیده شناوری است که در پی آن تعادل دمایی در حجم کنترل (گلخانه) حاصل می‌شود. چنانکه در مقطع افقی ارتفاع یک متری گلخانه مشاهده می‌شود، بیش‌ترین تغییرات بردار سرعت جریان هوا مربوط به نواحی نزدیک به دیواره‌های شمالی و جنوبی می‌باشد. علت این پدیده تغییرات چگالی ناشی از تغییرات دمایی در این نواحی است که همراه با تغییرات دمای المان هوای نزدیک به دیواره‌ها، تغییر در میزان چگالی رخ داده و به تبع آن جابه‌جایی هوا از ناحیه پرچگالی به سمت ناحیه کم‌چگالی رخ می‌دهد که این امر باعث ایجاد جریان پرسرعت در نواحی با گرادیان دمایی بالا می‌گردد. طبق نتایج شکل ۱۲ از رفتار جریان هوا در مقطع عمودی می‌توان دریافت که بیشترین سرعت مربوط به نواحی است که تفاوت دمایی بیش‌تری با المان نزدیک خود داشته‌اند (نزدیک به کف، دیواره‌ها و سقف).



شکل ۱۱– تغییرات دما در مقطع افقی و ارتفاع یک متری از کف گلخانه در ساعت‌های مختلف (A: ساعت ۱۰؛ B: ساعت ۱۲؛ C: ساعت ۱۶) و تغییرات دما در مقطع عمودی گلخانه در ساعت‌های مختلف (D: ساعت ۱۰؛ E: ساعت ۱۲؛ F: ساعت ۱۶)

Fig.11. Temperature changes in the horizontal section and a height of one meter from the greenhouse floor at different hours (A: 10:00 am; B: 12:00; C: 16:00 pm) and temperature changes in the vertical section at different hours (A: 10:00 am; B: 12:00; C: 16:00 pm).



شکل ۱۲– جریان هوا در مقطع افقی و ارتفاع یک متری در ساعات مختلف (A: ۱۰ صبح، B: ۱۲ ظهر، C: ۱۶ عصر) و همچنین جریان هوا در مقطع عمودی در ساعات مختلف (D: ۱۰ صبح، E: ۱۲ ظهر، F: ۱۶ عصر)

Fig.12. Air flow in horizontal section and a height of one meter from the greenhouse floor at different hours (A: 10:00 am; B: 12:00; C: 16:00 pm) and air flow in horizontal section at different hours (A: 10:00 am; B: 12:00; C: 16:00 pm)

از آنجا که کف و دیواره شمالی مهم‌ترین عامل تغییرات دمایی محیط داخل به حساب می‌آید، مشاهده می‌شود که در این نواحی در ساعت ۱۲ بیشترین جریان هوا و به تبع آن بیشترین تبادل حرارت رخ داده است. بیشترین تغییرات جریان هوا در مقطع افقی، ساعت ۱۲ مربوط به دیواره‌های شمالی و جنوبی است. هرچه به سمت غروب آفتاب نزدیک می‌شویم، جریان هوا بیشتر در مرکز گلخانه سرعت پیدا می‌کند. همچنان که در تصاویر مشاهده می‌شود، تغییرات جریان در مقطع افقی سیال کم بوده و در نتیجه یکنواختی قابل‌توجهی در سرعت، چگالی و دما در مقاطع افقی مشاهده می‌شود و تنها تبادل حرارتی بین سیال و دیواره‌ها جریان پرسرعت در کناره‌ها را سبب می‌شود. البته میزان لزجت هوا در شدت سرعت هوا و دیواره‌ها هم مؤثر است (Holman, 2010). این افزایش سرعت سبب افزایش تبادل حرارت بین سیال و دیواره می‌گردد و تا زمانی که این شیب به سمت دیواره باشد، در مناطق گرم مانند خوزستان به‌عنوان مزیت تلقی می‌شود. در تحقیقی روند انتقال حرارت در حجم داخلی گلخانه خورشیدی در دانشگاه کشاورزی مانگولیا چین با پوشش فیلم دو لایه را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بررسی شد و بر کارا بودن این روش محاسبه در پیش‌بینی شرایط دمایی و رطوبت موجود در گلخانه صحه گذاشته شد (Jiao *et al.*, 2020). پژوهشگران دیگری نیز از این روش به منظور بررسی شرایط داخلی گلخانه‌ها از جمله تأثیر سیستم تهویه از سقف در گلخانه‌های تجاری یا تأثیر انرژی تابش خورشید بر محیط داخل گلخانه استفاده کردند و مؤثر بودن این روش محاسباتی در پیش‌بینی محیط داخل گلخانه را تأیید کردند (Munar & Aldana, 2019; Saberian & Sajadieh, 2019).

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر از روش دینامیک سیالات محاسباتی به منظور شبیه‌سازی شرایط داخلی یک گلخانه مدفون در خاک با سقف نامتقارن شیشه‌ای با استفاده از متغیرهای بیرونی و داخلی گلخانه شامل دما و شدت تابش خورشید، استفاده شد. نتایج نشان داد که گلخانه مدفون در زمین قادر است بخشی از افزایش دمای ناشی از تابش خورشید را به عمق خاک منتقل کند. گلخانه موجود ۱۰۴/۲۱۴ کیلوژول بر مترمربع حرارت را از طریق کف، ۱۷۸/۴۳۳ کیلوژول بر مترمربع از طریق دیواره شمالی و ۱۱۳/۷۵۷ کیلوژول بر مترمربع از طریق دیواره جنوبی در مدت زمان انجام آزمایش به زمین منتقل کرد. اگرچه این میزان در برابر انرژی تولید شده توسط پرتوهای تابش ناچیز به نظر می‌رسد (۴٪)، ولی باید درنظر داشت که در صورت وجود گلخانه بر سطح زمین، میزان پرتوهای تابش ورودی افزایش می‌یابد (با حذف دیواره شمالی و جنوبی و در معرض خورشید قرار گرفتن کل گلخانه)، دیواره شمالی و جنوبی حذف می‌گردد (مخزن دریافت گرمای انباشته) و سطح منبع دریافت پرتوهای تابشی افزایش می‌یابد (در وضعیت موجود منبع دریافت پرتوهای تابش برابر با ۳۳/۷۲ مترمربع است. یعنی سطح دیوار شمالی (۹/۷۲ مترمربع) به اضافه بخش آفتاب‌گیر کف (۲۴ مترمربع) در حالی که در حالت وجود گلخانه بر سطح زمین، مساحت منبع دریافت پرتوهای تابش برابر با ۳۸ مترمربع می‌شود. با بررسی و افزایش ضریب انتقال حرارت دیواره و کف گلخانه (انتخاب مصالح با ضریب انتقال حرارت بالا) و استفاده از سیستم جریان همرفت در پشت دیواره‌ها می‌توان این مقدار را افزایش داد. با توجه به وجود دمای نزدیک به ۴۰ درجه سلسیوس در اواخر فصل پاییز در داخل گلخانه در این منطقه، می‌توان گفت که این گلخانه بدون سیستم سرمایش کارآمد، مناسب تولید گیاه نیست. همچنین با انتخاب پوشش مناسب و شیب سقف متناسب با تابش خورشید، می‌توان ورود پرتوهای تابشی را تا حدودی کاهش داد. تطابق یافته‌ها و شبیه‌سازی مدل دمایی در ارتفاع یک متری و دو متری نشان داد که شبیه‌سازی به کمک CFD قادر است به درستی و با دقت مناسبی شرایط دمایی داخل گلخانه را در ارتفاع مورد نیاز، تخمین بزند و می‌تواند در تحقیقات کاربردی به منظور انتخاب بهینه سازه و مصالح گلخانه با توجه به شرایط آب و هوایی و همچنین به‌منظور هوشمندسازی گلخانه‌ها در آینده مورد استفاده قرار گیرد.

References

1. Abdel Ghany, A. M., & Helal, I. M. (2011). Solar energy utilization by a greenhouse: general relations. *Renewable Energy*, *36*, 189-196. https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.020.
2. Abu-Hamdeh, N. H., & Reeder, R. C. (2000). Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, *64*(4), 1285-1290. https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6441285x.
3. Ahamed, S., Guo, H., & Tanino, K. 2019. Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. *Biosystems Engineering*, *178*, 9-33. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.017.
4. Bergman, T. L., Incropera, F. P., Lavine, A. S., & Dewitt, D. P. (2011). *Introduction to heat transfer*. John Wiley & Sons. Amsterdam.
5. Bolandnazar, E., Sadrnia, H., Rohani, A., & Taki, M. (2019). Prediction of Temperature in a Greenhouse Covered with Polyethylene Plastic Using Artificial Neural Networks, Case Study: Jiroft Region. *Iranian Journal of*

Biosystem Engineering, *51*(1), 125-137. https://doi.org/10.22059/ijbse.2019.291077.665235.
6. Dayioğlu, M. A., & Silleli, H. H. (2015). Performance analysis of a greenhouse fan-pad cooling system: gradients of horizontal temperature and relative humidity. *Journal of Agricultural Science*, *21*, 132-143. https://doi.org/10.15832/TBD.25721.
7. Fidaros, D. K., Baxevanou, C. A., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2010). Numerical simulation of thermal behavior of a ventilated arc greenhouse during a solar day. *Renewable Energy*, *35*, 1380-1386. https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.013.
8. Ghani, S., Bakochristou, F., ElBialy, E. M., Gamaledin, A. A., Rashwan, S. M. A., Abdelhalim, M. M., & Ismail, S. M. 2019. Design challenges of agricultural greenhouses in hot and arid environments– A review. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, *12*, 48-70. https://doi.org/10.1016/j.eaef.2018.09.004.
9. Ghasemi Mobtaker, H., Ajabshirchi, Y., Ranjbar, S. F., & Matloobi, M. (2019). Simulation of thermal performance of solar greenhouse in north-west of Iran: An experimental validation. *Renewable Energy*, *135*, 88-97. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.003.
10. Hamdani, M., Taki, M., Rahnama, M., Rohani, A., & Rahmati-joneidabad, M. (2020). Prediction the inside Variables of Even-span Glass Greenhouse with Special Structure by Artificial Neural Network (MLP-RBF) Models. *Journal of Agricultural Machinery*, *10*(2), 213-227. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.v10i2.72346
11. Holman, J. P. (2010). Heat Transfer. Eighth ed. McGraw-Hill Science, New York.
12. Jiao, W., Qi, L., Lijun, G., Kunyu, L., Shi, R., & Ta, N. (2020). Computational Fluid Dynamics-Based Simulation of Crop CanopyTemperature and Humidity in Double-Film Solar Greenhouse. *Journal of Sensors*, 1-15. https://doi.org/10.1155/2020/8874468.
13. Joudi, K., & Farhan, A. (2015). A dynamic model and an experimental study for the internal air and soil temperatures in an innovative greenhouse. *Energy Conversion and Management*, *91*, 76-82. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.052.
14. Moghaddam, J. J., Ozlati, S., Zarei, Gh., Momeni, D., & Azadshahraki, F. (2021). Ventilation and Cooling Modeling and Lyout of Fans, Pads and Vents of an Octagonal Greenhouse. *Journal of Agricultural Machinery*, *11*(2), 247-262. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.v11i2.82130.
15. Munar, E., & Aldana, C. (2019). CFD Simulation of the Increase of the Roof Ventilation Area in a Traditional Colombian Greenhouse: Effect on Air Flow Patterns and Thermal Behavior. *International Journal of Heat and Technology*, *7*(3), 881-892. http://doi.org/10.18280/ijht.370326
16. Nadi, F., Abdanan Mehdizadeh, S., & Nourani Zonouz, O. (2016). Comparing between predicted output temperature of flat-plate solar collector and experimental results: computational fluid dynamics and artificial neural network. *Journal of Agricultural Machinery*, *7*(1), 298-311. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.v7i1.59698.
17. Pakari, A., & Ghani, S. (2019). Evaluation of a novel greenhouse design for reduced cooling loads during the hot season in subtropical regions. *Solar Energy*, *181*, 234-242. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.006.
18. Roy, J. C., Boulard, T., Kittas, C., & Wang, S. 2002. Convective and ventilation transfers in greenhouses, Part 1: the greenhouse considered as a perfectly stirred tank. *Biosystems Engineering*, *83*, 1-20. https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0107.
19. Saberian, A., & Sajadiye, S. M. (2019). The effect of dynamic solar heat load on the greenhouse microclimate using CFD simulation. *Renewable Energy*, 138, 722-737. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.108.
20. Santolini, E., Pulvirenti, B., Benni, S., Barbaresi, L., Torreggiani, D., & Tassinari, P. (2018). Numerical study of wind-driven natural ventilation in a greenhouse with screens. *Computers and Electronics in Agriculture*, *149*, 41-53. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.027.
21. Taki, M., Ajabshirchi, Y., Ranjbar, S. F., Rohani, A., & Matloobi, M. (2016a). Heat transfer and MLP neural network models to predict inside environment variables and energy lost in a semi-solar greenhouse. *Energy and Buildings*, *110*, 314-29. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.010.
22. Taki, M., Ajabshirchi, Y., Ranjbar, S. F., Rohani, A., & Matloobi, M. (2016b). Modeling and experimental validation of heat transfer and energy consumption in an innovative greenhouse structure. *Information Processing in Agriculture*, *3*, 157-174. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.06.002.
23. Taki, M., Rohani, A., & Rahmati-Joneidabad, M. (2018). Solar thermal simulation and applications in greenhouse. *Information Processing in Agriculture*, *5*, 83-113. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.10.003.
24. Wang, J., Li, S., Guo, S., Ma, C., Wang, J., & Sun, J. (2017). Analysis of heat transfer properties of hollow block wall filled by different materials in solar greenhouse. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, *10*, 31-38. https://doi.org/10.1016/j.eaef.2016.07.003.
25. Zhang, X., You, S., Tian, Y., & Li, J. (2019). Comparison of plastic film, biodegradable paper and bio-based film mulching for summer tomato production: Soil properties, plant growth, fruit yield and fruit quality. *Sciatica Horticulture*, *249*, 38-48. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.037.